

Warszawa, dnia 5 stycznia 1952 r.



B601 9/20



RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ OPIS PATENTOWY

Nr 34285

Kl. 20 1, 4/02

Ganz & Co

Elektrizitäts-, Maschinen-, Waggon-, und Schiffbau Aktiengesellschaft
(Budapeszt, Węgry)

Urządzenie napędowe szynowego pojazdu elektrycznego, zasilanego z jednofazowej sieci trakcyjnej

Udzielono z mocą od dnia 31 marca 1948 r.

W znanym systemie Kandö, służącym do napędu elektrycznych pojazdów szynowych i zawierającym przetwornicę faz, indukcyjny silnik trakcyjny jest zasilany wielofazowym prądem niskiego napięcia, przetworzonym z jednofazowego prądu wysokiego napięcia sieci trakcyjnej, przy czym jest on zaopatrzony w przełącznik liczby biegunów oraz w wirnik pierścieniowy, z którego moment obrotowy jest przenoszony za pośrednictwem mechanizmu korbowego na koła napędne. System powyższy nie nadaje się do tak zwanego napędu indywidualnego, w którym poszczególne osie napędne są napędzane poprzez odpowiednią przekładnię zębatą za pomocą oddzielnych, lekkich silników szybkobieżnych, dostosowanych do rozmiarów podwozia, w którym brak jest na ogół miejsca na to, by silniki takie wykonać w postaci, umożliwiającej niezbędne wielostopniowe przełączanie biegunów, oraz zaopatrzyć je w większą liczbę uzwojeń i pierścieni ślizgowych.

Aby uzyskać napęd indywidualny stosuje się

ponadto inny system napędowy, w którym oprócz przetwornicy faz zainstalowany jest na lokomotywie agregat, składający się z przetwornicy częstotliwości i skojarzonego z nią mechanicznie silnika regulacyjnego. Uzwojenie pierwotne przetwornicy częstotliwości jest połączone z przetwornicą faz, uzwojenie wtórne zaś — z silnikami trakcyjnymi, budowanymi na stałą liczbę par biegunów i zaopatrzonymi w zwarte wirniki, przy czym liczbę obrotów agregatu maszynowego można regulować za pomocą silnika regulacyjnego w ten sposób, iż wtórna częstotliwość przetwornicy częstotliwości wzrasta od zera poprzez częstotliwość nominalną do wartości maksymalnej, na skutek czego zmienia się również liczba obrotów silników trakcyjnych, zasilanych za pośrednictwem przetwornicy częstotliwości, oraz prędkość pociągu. W tym celu należy obniżać stopniowo liczbę obrotów agregatu od synchronicznej liczby obrotów do zera, a następnie, po zmianie kierunku obrotów silnika regulacyjnego, powiększać ją do pewnej maksy-

malnej wartości. W praktyce proces powyższy zachodzi zawsze zgodnie z prędkością chwilową pociągu.

W zespole napędowym według wynalazku, zaopatrzonym również w przetwornicę faz, wytwarza się wymaganą do napędu indywidualnego zmienną częstotliwość za pomocą jednego agregatu maszynowego, obracającego się ze stałą liczbą obrotów, odpowiadającą częstotliwości sieci. Agregat ten składa się z przetwornicy faz oraz połączonej z nią mechanicznie, a najczęściej również elektrycznie, przetwornicy częstotliwości o przełączanych biegunach. W układzie tym stosuje się, zgodnie z systemem Kandō, silniki indukcyjne, zaopatrzone w pierścienie ślizgowe i wykonane na stałą liczbę par biegunów ze względu na szczupłość miejsca w podwoziu.

Przetwornica częstotliwości zespołu napędowego według wynalazku jest podobna pod względem wykonania do wielofazowego, pierścieniowego silnika asynchronicznego, którego uzwojenie pierwotne jest połączone przynajmniej dla pewnej części zakresu osiągalnych stopni prędkości z uzwojeniem wtórnym przetwornicy faz, podczas gdy jego uzwojenie wtórne łączy się poprzez pierścienie ślizgowe z pierwotnym uzwojeniem (stojana) silnika trakcyjnego. W związku z powyższymi uwagami istota wynalazku polega na tym, że obwód pierwotny (ewentualnie również wtórny) przetwornicy częstotliwości, służącej do tak zwanego „pośredniego” zasilania wielofazowych silników trakcyjnych, jest dostosowany do skutecznego w nim przełączeń, dzięki którym względna prędkość obrotowa pola wirującego uzwojenia pierwotnego przetwornicy częstotliwości, odniesiona do jej uzwojenia wtórnego, uzyskuje wartości, różniące się między sobą o wielkości, odpowiadające pewnym podstawowym stopniom prędkości.

Na rysunku fig. 1 przedstawia uzwojenie pierwotne 1, uzwojenie wtórne 2, uzwojenie wzbudzenia 3 przetwornicy faz, wzbudnicę 4, uzwojenie 5 stojana przetwornicy częstotliwości, uzwojenie 6 wirnika, uzwojenia 7, 7' stojanów silników trakcyjnych, uzwojenia 8, 8' ich wirników, oporniki rozruchowe 9 i 9' tych silników. Części wirujące zespołu maszynowego, oznaczone cyframi 3, 4 i 6, są osadzone na wspólnym wałę lub połączone ze sobą za pomocą odpowiedniego sprzęgła. Charakterystyczne dla wynalazku przełączenia, które należy przeprowadzać w pierwotnym obwodzie prądu (ewentualnie również we wtórnym) przetwornicy częstotliwości, można zgodnie z poniższymi rozważaniami wykonywać w taki sposób, iż dzięki nim będzie ulegać zmianie kierunek wirowania pola wzbudzenia przetwornicy częstotliwości w sto-

unku do uzwojenia wzbudzenia. W tym celu wystarczy przy dwóch dowolnych przewodach fazowych 10, 11, 12, łączących przetwornicę faz z przetwornicą częstotliwości, zamienić znajdujące się na jednej z nich końcówki przewodów.

Ponadto pierwotne uzwojenie przetwornicy częstotliwości może być wzbudzone dla pewnych stopni zamiast prądem wielofazowym również prądem stałym, co wymaga pewnych układów połączeń również w obwodzie wzbudzenia. Prócz tego w przypadku wzbudzania przetwornicy prądem wielofazowym można, w celu oddziaływania na stopniową zmianę prędkości obrotów pola wzbudzenia, stosować zarówno w obwodzie stojana, jak i w obwodzie wirnika również przełączanie liczby par biegunów. Wreszcie można wszystkie te możliwości danego urządzenia napędowego kojarzyć dowolnie ze sobą. Wypada zaznaczyć, że określenia: przetwornica faz i przetwornica częstotliwości należy w przypadku omawianych jednostek maszynowych rozumieć raczej w znaczeniu sposobu budowy, nie zaś sposobu działania, ponieważ np. przy wzbudzeniu przetwornicy częstotliwości prądem stałym, wtórny obwód prądu przetwornicy faz jest otwarty, tak iż spełnia ona wtedy rolę silnika synchronicznego przetwornicy dwutwornikowej, podczas gdy przetwornica częstotliwości przetwarza w tym przypadku nie tylko wielkość częstotliwości, lecz również liczbę faz. W takich przypadkach następuje przenoszenie energii między przetwornicą faz (lub silnikiem synchronicznym) i przetwornicą częstotliwości na drodze czysto mechanicznej, natomiast w przypadku działania przetwornicy faz jako takiej — na drodze częściowo mechanicznej, częściowo zaś elektrycznej. Zasilanie silników trakcyjnych poprzez przetwornicę częstotliwości należy nazywać zasilaniem pośrednim, podczas gdy zasilanie na stopniu prędkości, odpowiadającym częstotliwości sieci, może następować bezpośrednio z przetwornicy faz w ten sposób, że silniki trakcyjne są łączone, z pominięciem przetwornicy częstotliwości, z uzwojeniem wtórnym przetwornicy faz, na skutek czego unika się strat w odnośnej jednostce zespołu maszynowego. Z tego względu zaleca się przeprowadzać omawiane bezpośrednie łączenie dla stopnia prędkości użytkowej.

Zmiana kierunku wirowania pola wzbudzenia przetwornicy częstotliwości może służyć, na podstawie podanego niżej rozważania, do wytwarzania kilku częstotliwości wtórnych (lub kilku stopni prędkości).

W przypadku zasilania pośredniego oraz przy założeniu, że przetwornica częstotliwości jest wzbudzona prądem wielofazowym, do jej

uzwojenia pierwotnego 5 dopływa otrzymany z uzwojenia 2 przetwornicy faz prąd trójfazowy o częstotliwości f_1 , wytwarzający wirujące pole wzbudzenia. Jeżeli liczba biegunów uzwojenia pierwotnego przetwornicy częstotliwości wynosi p_p (liczba parzysta), wówczas liczba obrotów tego pola na sekundę w odniesieniu do uzwojenia 5 wynosi $2f_1 : p_p$. W polu wzbudzenia obraca się uzwojenie wtórne 6 przetwornicy czę-

stotliwości z liczbą obrotów $2f_1 : p_f$, gdzie p_f oznacza liczbę biegunów przetwornicy faz. Jest to jednocześnie liczba obrotów uzwojenia wzbudzenia 3 przetwornicy faz, połączonej mechanicznie z wirnikiem 6. Wobec tego względna liczba obrotów n_w uzwojenia wtórnego 6 przetwornicy częstotliwości wynosi w odniesieniu do pola, wzbudzającego to uzwojenie:

$$n_w = \frac{2f_1}{p_p} \pm \frac{2f_1}{p_f} = \frac{2 \cdot (p_f \pm p_p)}{p_f \cdot p_p} \cdot f_1$$

czyli częstotliwość prądu, wytworzonego w tym uzwojeniu

$$f_2 = n_w \cdot \frac{p_p}{2} = 2 \cdot \frac{p_f \pm p_p}{p_f \cdot p_p} \cdot f_1 \cdot \frac{p_p}{2} = \frac{p_f \pm p_p}{p_f} \cdot f_1$$

W powyższym wzorze wielkość $p_f - p_p$ uwzględnia się wówczas, gdy uzwojenie pierwotne przetwornicy częstotliwości jest włączone na kierunek wirowania pola, zgodny z kierunkiem obrotów zespołu maszyn, wielkość zaś $p_f + p_p$ — gdy kierunki te są przeciwne. Należy zaznaczyć, że stosownie do powyższych rozważań, wzór na częstotliwość wtórną f_2 jest ważny również w tym przypadku, gdy uzwojenie pierwotne przetwornicy częstotliwości wiruje wraz z uzwojeniem wzbudzającym 3, uzwojenie wtórne zaś jest umieszczone w stojanie. Wówczas znak „+” stosuje się we wzorze przy obrotach o kierunkach zgodnych, a znak „—” przy obrotach o kierunkach przeciwnych.

Ze względu na to, że silniki trakcyjne z wirującymi polami wzbudzenia dążą do obrotów synchronicznych, z większym lub mniejszym poślizgiem, zależnym od wartości oporów oporników rozruchowych lub regulacyjnych 9, 9', włączonych w obwód wtórny, oraz od obciążenia, zamierzony efekt, to znaczy wytworzenie poszczególnych stopni prędkości jazdy, osiąga się zgodnie ze wzorem w ten sposób, iż przez przełączenia, dokonywane między uzwojeniem wtórnym przetwornicy faz i uzwojeniem pierwotnym przetwornicy częstotliwości (to znaczy w układzie przewodów 10 — 12), zmienia się skokami częstotliwość f_2 prądu, służącego do zasilania silników trakcyjnych a tym samym prędkość wirowania pola wzbudzenia tych silników. Ponieważ zmiana prędkości między poszczególnymi stopniami następuje tu przez włączanie odpowiednich oporów regulacyjnych silników trakcyjnych, co wiąże się z pewnymi stratami energii na ciepło Joule'a, tym większymi, im mniejsza jest liczba stopni dla danego zakresu regulacji, przeto zaleca się zwiększyć liczbę stopni regulacyjnych np. przez przełączanie par biegunów przetwornicy częstotliwości, przy czym nowa wtórna częstotliwość, odpowiadająca zmie-

nionej liczbie par biegunów, wynika również z wprowadzonego wzoru dla f_2 .

Jeśli przetwornica faz posiada 2 pary biegunów, przetwornica częstotliwości zaś — 1 parę, wówczas, zgodnie ze wzorem, osiągalne częstotliwości wtórne wynoszą:

$$f_2 = \frac{f_1}{2} \cdot f_2 = f_1 \text{ oraz } f_2 = \frac{3}{2} \cdot f_1$$

przy czym wartość środkową można osiągnąć przez bezpośrednie podłączenie uzwojeń stojanów silników trakcyjnych do uzwojenia wtórnego przetwornicy faz.

Jeśli w celu zwiększenia liczby stopni regulacyjnych przetwornica częstotliwości rozrządza przełączanymi biegunami np. 2/4 biegunami, przetwornica faz zaś jest np. sześciobiegunowa, wówczas osiągalne stosunki wtórnej częstotliwości do pierwotnej wynoszą odpowiednio: $(6 \pm 4) : 6$ lub $(6 + 2) : 6$, czyli po uporządkowaniu ich według wartości rosnących: $1/3$, $2/3$, $3/3$, $4/3$ oraz $5/3$, a zatem można otrzymać łącznie pięć częstotliwości lub stopni prędkości.

Przy innych liczbach par biegunów uzyskuje się dla wtórnych częstotliwości odpowiednio inne wartości; ogólnie przy r — krotnym przełączaniu biegunów przetwornicy częstotliwości liczba uzyskiwanych stopni regulacyjnych wynosi $2r + 1$, przy założeniu, że liczba par biegunów przetwornicy faz przewyższa największą możliwą liczbę par biegunów przetwornicy częstotliwości.

O ile ponadto, w celu uzyskania dalszych stopni prędkości (głównie niższych), uzwojenie pierwotne przetwornicy częstotliwości, podobnie do prądnicy prądu zmiennego, jest zasilane prądem stałym, otrzymuje się na tych stopniach (przy nieruchomym polu wzbudzenia) częstotliwość wtórne, wynoszące $f_2 = f_1 \cdot \frac{p_p}{p_f}$. Tak np. przy sześciobiegunowej przetwornicy faz i dwubiegu-

nowej przetwornicy częstotliwości można otrzymać 4 stopnie regulacyjne:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{3}{3}, \frac{4}{3}$$

lub przy dziesięciobiegunowej przetwornicy faz i 2/4 biegunowej przetwornicy częstotliwości — 7 stopni:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2}{10}, \frac{4}{10}, \frac{10+2}{10}, \frac{10-2}{10}, \frac{10}{10}, \frac{10+4}{10}, \frac{10-4}{10}$$

czyli po uporządkowaniu postępu według wartości rosnących:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}, \frac{5}{5}, \frac{6}{5}, \frac{7}{5}$$

Ogólnie można przy r-krotnym przełączaniu biegunów przetwornicy częstotliwości otrzymać $3r + 1$ stopni przy założeniu, że liczba par biegunów przetwornicy faz jest większa niż podwojona najwyższa liczba par biegunów przetwornicy częstotliwości.

Liczbę par biegunów dla przetwornicy częstotliwości ustala się na 1 lub 1/2, ewentualnie 1/2/3 par biegunów, podczas gdy liczba par biegunów przetwornicy faz winna przewyższać o 1 największą liczbę par biegunów przetwornicy częstotliwości, przy zastosowaniu zaś zasilania prądem stałym — jej podwojoną, największą liczbę par biegunów. Wówczas poszczególne stopnie regulacyjne tworzą, jak to wynika z przytoczonych przykładów, wyrazy postępu arytmetycznego, przy czym ich liczba jest możliwie największa. Jeśli nawet odstąpić od tego warunku, to przy odpowiednim doborze liczby par biegunów można mimo wszystko uzyskać stopnie regulacji, odpowiadające wyrazom postępu arytmetycznego, przy czym odchylenia względem przytoczonych przykładów stają się dostrzegalne w inny sposób. Jeśli wyeliminować dla uproszczenia przypadek wzbudzania przetwornicy częstotliwości prądem stałym, wówczas okoliczność, że liczba biegunów przetwornicy faz jest np. wyższa niż przytoczona uprzednio, przyczyni się jedynie do tego, iż różnica między pierwszym stopniem prędkości i stopniem zerowym będzie większa niż różnice (stałe) między następnymi stopniami. Jeśli np. $p_f = 8$ a $p_p = 2/4$, wówczas otrzymuje się ze wzoru na f_2 , uwzględniając również przypadek bezpośredniego połączenia ($f_2 = f_1$), następujące wartości:

$$f_2 = 2/4 f_1, 3/4 f_1, 4/4 f_1, 5/4 f_1, 6/4 f_1$$

O ile zatem różnica między podanymi wyrazami tego postępu wynosi $1/4 f_1$, o tyle różnica między najniższym stopniem częstotliwości i częstotliwością zerową wynosi $1/2 f_1$. Przy wzbudzeniu przetwornicy częstotliwości prądem sta-

łym wynika dla $p_p = 2$ nowy stopień $f_2 = 1/4 f_1$, stanowiący uzupełnienie postępu arytmetycznego do pełnej postaci, natomiast dla $p_p = 4$ uzyskane $f_2 = \frac{1}{2} f_1$ stanowi powtórzenie otrzymanej uprzednio wartości. Jeśli na odwrót p_f jest niższe niż podane uprzednio, wówczas niektóre wyrazy postępu, jako równe zeru lub ujemne odpadają w praktyce, tak że rzeczywista liczba stopni będzie niższa, niż teoretycznie możliwa.

Np. jeśli $p_f = 4$ i $p_p = 2/4/6$ otrzymuje się:

$$\text{dla } p_p = 2f_2 = 1/2 f_1 \text{ oraz } f_2 = 3/2 f_1$$

$$\text{dla } p_p = 4f_2 = 0 \text{ oraz } f_2 = 2 f_1$$

$$\text{dla } p_p = 6f_2 = -1/2 f_1 \text{ oraz } f_2 = 5/2 f_1$$

tak iż przy wyeliminowaniu wartości $f_2 = 0$ oraz $f_2 = -1/2 f_1$, uzyskuje się po dodaniu wartości $f_2 = f_1$ szereg następujących wtórnych częstotliwości:

$$f_2 = 1/2 f_1; \frac{2}{2} f_1; 3/2 f_1; 4/2 f_1; 5/2 f_1$$

Przy odmianie tego przypadku, dla której $p_f = 4$, $p_p = 2/4$ uzyskuje się po wykluczeniu wartości zerowej:

$$f_2 = 1/2 f_1; 2/2 f_1; 3/2 f_1; 4/2 f_1$$

W innym przykładzie z $p_f = 6$ i $p_p = 2/4/6$ jako wtórne częstotliwości otrzymuje się:

$$\text{dla } p_p = 2f_2 = 2/3 f_1 \text{ oraz } f_2 = 4/3 f_1$$

$$\text{dla } p_p = 4f_2 = 1/3 f_1 \text{ oraz } f_2 = 5/3 f_1$$

$$\text{dla } p_p = 6f_2 = 0 \text{ oraz } f_2 = 2 f_1$$

tak iż odpada wówczas jedynie wartość $f_2 = 0$ i postępowanie wygląda po dodaniu $f_2 = f_1$ w następujący sposób:

$$f_2 = 1/3 f_1, 2/3 f_1, 3/3 f_1, 4/3 f_1, 5/3 f_1, 6/3 f_1$$

Należy zaznaczyć, że ujemny wyraz postępu, złożonego z wtórnych częstotliwości, oznacza, iż względny kierunek wirowania pola wzbudzającego, w odniesieniu do uzwojenia wtórnego przetwornicy częstotliwości, zmienia się na przeciwny. Ponieważ jednocześnie zmienia się analogicznie kierunek wirowania pola wzbudzenia silników trakcyjnych, przeto można wykorzystać ujemną częstotliwość do zmiany kierunku ruchu pojazdu na wsteczny, który zachodzi zazwyczaj na jednym stopniu prędkości. Zmianę taką można poza tym i to na dowolnym stopniu przeprowadzić po prostu w ten sposób, że zamienia się między sobą końcówki dwóch dowolnych przewodów 13, 14, 15, połączonych z uzwojeniami stojanów silników trakcyjnych.

Jeśli $p_p \geq p_f$ wówczas stopnie prędkości, wynikające ze wzbudzania przetwornicy częstotli-

wości prądem stałym należą do górnego zakresu prędkości (odpowiadającego częstotliwości $f_2 \geq f_1$), przy czym jeśli liczby biegunów nie są dobierane według wyżej określonej zasady, wówczas może zajść wymieniony uprzednio przypadek, że stopnie prędkości, odpowiadające danym wtórnym częstotliwościom, uzyskuje się w dwojaki sposób, to znaczy przy wzbudzeniu albo bez wzbudzenia przetwornicy prądem stałym (lub dla przypadku $f_2 = f_1$ — przez zastosowanie połączenia bezpośredniego lub bez niego). Np. w przypadku przytoczonym uprzednio, to jest przy $p_f = 4$ i $p_p = 2/46$, stopnie prędkości, odpowiadające wtórnym częstotliwościom $f_2 = 1/2 \cdot f_1$, $2/2 \cdot f_1$, $3/2 \cdot f_1$ (a więc również stopień, odpowiadający bezpośredniemułączeniu układu zasilającego z silnikami trakcyjnymi), mogą być osiagnięte, stosownie do wzoru: $f_2 = f_1 \cdot \frac{p_p}{p_f}$, również drogą wzbudzenia przetwornicy prądem stałym.

Zgodnie z poprzednim stwierdzeniem jest rzeczą korzystną pracować przy bezpośrednim układzie połączeń (odpowiadającym częstotliwości $f_2 = f_1$) na takim stopniu regulacyjnym, który odpowiada średniej prędkości przelotowej pojazdu i związanej z nią maksymalnej sprawności silników trakcyjnych. Przy lokomotywach manewrowych jest to najniższy stopień prędkości, ponieważ manewrowanie odbywa się z nieznacznymi prędkościami, w przeciwieństwie np. do przetaczania lokomotywy na inną stację, które odbywa się ze znaczną prędkością. Jeśli np. $p_f = 4$ i $p_p = 2/4$, wówczas dla $p_p = 2$, $f_2 = 1/2 \cdot f_1$ oraz $f_2 = 3/2 \cdot f_1$, natomiast dla $p_p = 4$, $f_2 = 0$ oraz $f_2 = f_1$ tak iż przy pominięciu stopnia $f_2 = 1/2 \cdot f_1$ oraz po uwzględnieniu stopnia $f_2 = f_1$ otrzymuje się następujący szereg wtórnych częstotliwości:

$$f_2 = f_1; 3/2 \cdot f_1; 2f_1$$

Na ogół silniki trakcyjne winny rozwijać przy niższych stopniach regulacyjnych większą moc niż przy wyższych stopniach. Z tego względu jest rzeczą korzystną wzbudzać silniki trakcyjne przy niższych stopniach prędkości mocniejszym polem, czyli zasilać je wyższym napięciem, niż przy wyższych stopniach. Można to osiągnąć w ten sposób, iż przekładnia napięć przetwornicy częstotliwości jest różna dla poszczególnych zakresów prędkości. Zmianę przekładni uzyskuje się przez to, że dla pewnego zakresu prędkości uzwojenie wtórne przetwornicy faz łączy się ze stojanem przetwornicy częstotliwości, natomiast dla innego zakresu — z wirnikiem tejże przetwornicy jako częścią pierwotną. Jeśli przekładnia napięć uzwojeń stojana i wirnika przetwornicy częstotliwości wynosi K , wówczas silniki trakcyjne mogą oprócz

napięcia, jakie dostarcza im bezpośrednio przetwornica faz, czerpać na innych stopniach prędkości napięcia K — krotne lub $\frac{1}{K}$ — krotne przy czym większa wartość winna odpowiadać niższemu zakresowi prędkości. Przełączniki, służące do zmiany przekładni napięć przetwornicy częstotliwości, do przełączania stopni prędkości, bądź wreszcie do innych celów, nie są uwidocznione na rysunku.

Jak zostało już zaznaczone, przejście od stanu spoczynkowego na pierwszy stopień prędkości, a potem z każdego poszczególnego stopnia na stopień następny, dokonuje się przez stopniowe zwieranie oporników rozruchowych, włączonych w obwody wirników pierścieniowych silników trakcyjnych. Oporniki rozruchowe, włączone w obwody wirników poszczególnych silników, są izolowane od siebie elektrycznie, jednak napęd mechaniczny wszystkich rozruszników może być wspólny. Przy zwiększaniu prędkości pojazdu przełączanie z danego stopnia prędkości na stopień następny, połączone z jednoczesnym cofnięciem części ruchomej opornika rozruchowego z położenia krańcowego do położenia wyjściowego, wymaga pewnego czasu. W ciągu tego czasu silniki trakcyjne pozostają w stanie bezprądowym, siła pociągowa zanika i prędkość pociągu zmniejsza się, co zwłaszcza na terenach górzystych, przy pokonywaniu stromych odcinków toru, może spowodować duże straty prędkości. Aby usunąć, przynajmniej częściowo, tę niedogodność, silniki trakcyjne, łącznie z odpowiadającymi im rozrusznikami, są podzielone pod względem układów przełączeniowych na dwie grupy. W tym przypadku układ regulacyjny przełącza się początkowo w obrębie jednej grupy, podczas gdy druga grupa pozostaje jeszcze włączona i zapobiega w pewnym stopniu zmniejszeniu prędkości pojazdu, następnie — w obrębie drugiej grupy, podczas gdy osiagnięta przez pojazd prędkość jest podtrzymywana przez pierwszą grupę zespołu napędowego. Po ukończeniu przełączenia drugiej grupy praca na nowym stopniu prędkości może być rozpoczęta bez przejściowej straty prędkości. Przetwornica faz może posiadać w stojanie oddzielne uzwojenie jednofazowe wysokiego napięcia oraz trój- lub wielofazowe uzwojenie niskiego napięcia, bądź uzwojenie wspólne w układzie Ferrarisa — Arno, ewentualnie z dodatkową cewką dławikową i transformatorem. Do rozruchu przetwornicy faz nie jest potrzebny oddzielny silnik rozruchowy, ponieważ można użyć do tego celu przetwornicy częstotliwości.

Schemat połączeń układu napędowego według wynalazku, przedstawiony na rysunku, obejmuje sześciobiegunową przetwornicę faz i 2/4

biegunową przetwornicę częstotliwości (nie wzbudzaną prądem stałym). Zarówno stojan, jak i wirnik przetwornicy częstotliwości posiada uzwojenie 4-biegunowe. Powyższy układ połączeń odpowiada I stopniowi prędkości. Na II stopniu prędkości występuje ten sam układ, z tą różnicą, że zarówno stojan 5, jak i wirnik 6 posiada uzwojenie dwubiegunowe. Na III stopniu prędkości stojany silników trakcyjnych są zasilane bezpośrednio od uzwojenia wtórnego 2 przetwornicy faz częstotliwością sieci. Na IV stopniu prędkości przetwornica częstotliwości pracuje w układzie 2-biegunowym z tym, że uzwojenie 6 jej wirnika jest połączone z uzwojeniem wtórnym 2 przetwornicy faz, a uzwojenie 5 stojana — ze stojanami silników trakcyjnych, dzięki czemu uzyskuje się zmianę kierunku wirowania pola wzbudzenia przetwornicy częstotliwości. Na V stopniu prędkości występuje ten sam schemat połączeń, jak na IV stopniu, z tą różnicą, że przetwornica częstotliwości pracuje w układzie czterobiegunowym. W związku z tym w przypadku częstotliwości pierwotnej wynoszącej 50 Hz, silnikom trakcyjnym są dostarczane następujące częstotliwości wtórne:

$$16 \frac{2}{3}, 33 \frac{1}{3}, 50, 66 \frac{2}{3}, 83 \frac{1}{3} \text{ Hz}$$

wobec czego pozostające w tym samym stosunku stopnie prędkości pojazdu elektrycznego wynoszą odpowiednio np. 25, 50, 75, 100 i 125 km/godz. Przełączanie biegunów wykonuje się w dowolny, znany sposób.

W przytoczonych dotychczas przykładach między wtórnymi częstotliwościami, osiągalnymi za pomocą przetwornicy częstotliwości, występuje również wartość równa częstotliwości pierwotnej (częstotliwości sieci), uzyskiwana przy bezpośrednim łączeniu silników trakcyjnych z przetwornicą faz. Łączenie takie nie stanowi żadnego ograniczenia zakresu wynalazku, ponieważ przy wyeliminowaniu go zmienia się co najwyżej jedynie to, że stopnie prędkości nie tworzą postępu arytmetycznego, co w szczególnym przypadku może być nawet pożądaną, ewentualnie unikniętą w inny sposób. Mianowicie przez odpowiedni dobór liczby biegunów P_f i p_p można osiągnąć to, że wtórne częstotliwości tworzą nawet wówczas wyrazy postępu arytmetycznego. Np. dla $p_f=8$ oraz $p_p=2/6$ uzyskuje się według wzoru:

$$f_2/f_1 = 1/4, 3/4, 5/4, 7/4$$

$$\text{bądź dla } P_f = 10 \text{ oraz } p_p = 2/6:$$

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{2}{5}, \frac{4}{5}, \frac{6}{5}, \frac{8}{5}$$

W porównaniu ze wspomnianym uprzednio znanym układem, zaopatrzonym w specjalny

zespół maszynowy, złożony z przetwornicy częstotliwości i silnika regulacyjnego, oraz w zwarte silniki trakcyjne, układ napędowy według wynalazku posiada niżej podane zalety.

Można zaoszczędzić cały szereg maszyn np. silnik regulacyjny, silnik do napędu wentylatora, prądniczkę dla obrotomierza, mierzącego obroty przetwornicy częstotliwości, ponadto silnik rozruchowy dla przetwornicy faz oraz inne elementy układu.

Ponieważ nie stosuje się oddzielnego zespołu maszynowego w charakterze przetwornicy częstotliwości, przeto odpada strata czasu, zużywanego na jego rozruch lub na ponowne osiągnięcie przezeń niezbędnej liczby obrotów w przypadku zakłóceń w ruchu.

Ten stopień prędkości, przy którym silniki trakcyjne są połączone bezpośrednio z przetwornicą faz z pominięciem przetwornicy częstotliwości, odpowiada nie tylko nominalnym obrotom silników trakcyjnych, lecz ponadto całemu zakresowi obrotów, zawartemu między danym stopniem prędkości i kolejnym, poprzedzającym go.

W porównaniu z układem, zaopatrzonym w silnik regulacyjny, odpada w tym przypadku zatrzymywanie przetwornicy częstotliwości za pomocą przeciwpądu, maleją straty w opornikach, wzrasta siła pociągowa przy danej sprawności, dzięki czemu zostaje skrócony czas rozruchu i rozrusznik może posiadać mniejsze rozmiary.

Rozruch dokonuje się przy znacznie wyższych częstotliwościach, dzięki czemu jego warunki, które przy bardzo niskich częstotliwościach kształtują się niekorzystnie ze względu na stosunkowo duży udział strat czynnych, polepszają się do tego stopnia, że staje się zbędne stosowanie większych silników trakcyjnych w celu zapobieżenia tej niedogodności.

Wszystkim tym zaletom można przeciwstawić pewną cechę ujemną, tę mianowicie, że w układzie według wynalazku wirniki silników trakcyjnych nie są zwarte, lecz zaopatrzone w pierścienie ślizgowe i szczotki. Niedogodność ta może być jednak uważana, ze względu na doświadczenie konstruktorskie, jakie koła fachowe nabyły w związku z eksploatacją lokomotyw elektrycznych, zaopatrzonych przeważnie w silniki komutatorowe, jako nieznaczna lub wręcz jako pozorna.

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie napędowe szynowego pojazdu elektrycznego, zasilanego z jednofazowej sieci trakcyjnej i zaopatrzonego w indukcyjne silniki trakcyjne na prąd wielofazowy, znamienne tym, że posiada asynchro-

niczną przetwornicę częstotliwości, sprzęgniętą mechanicznie z przetwornicą faz oraz specjalny przełącznik, wykonujący przełączenia, dzięki którym dla różnych układów połączeń względna prędkość wirowania pola wzbudzenia, odniesiona do wzbudzanego uzwojenia przetwornicy częstotliwości, osiąga różne wartości, odpowiadające poszczególnym stopniom częstotliwości.

2. Urządzenie napędowe według zastrz. 1, znamienne tym, że posiada przełącznik, dzięki któremu można zmieniać na przeciwny kierunek wirowania pola, wzbudzonego prądem wielofazowym w przetwornicy częstotliwości.
3. Urządzenie według zastrz. 2, znamienne tym, że przełącznik posiada styki, umożliwiające przełączanie uzwojenia wzbudzenia przetwornicy częstotliwości na obwód prądu stałego.
4. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 3, znamienne tym, że posiada przełącznik, umożliwiający bezpośrednie łączenie wtórnego uzwojenia przetwornicy faz ze stojanami silników trakcyjnych.
5. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 4, znamienne tym, że przetwornica częstotliwości posiada przełączane bieguny.
6. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 5, znamienne tym, że liczba biegunów przetwornicy faz i przetwornicy częstotliwości jest tak dobrana, iż osiągalne stopnie prędkości tworzą wyrazy postępu arytmetycznego.
7. Urządzenie napędowe według zastrz. 1, 2, 4 — 6, znamienne tym, że liczba par biegunów przetwornicy faz przekracza o jedną najwyższą liczbę par biegunów przetwornicy częstotliwości.
8. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 6, znamienne tym, że liczba par biegunów przetwornicy faz jest o jedną wyższą niż podwojona najwyższa liczba par biegunów przetwornicy częstotliwości.
9. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 8, znamienne tym, że posiada przełącznik,

umożliwiający włączanie bądź stojana, bądź wirnika w obwód pierwotny przetwornicy częstotliwości.

10. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 9, znamienne tym, że w obwody wirników silników trakcyjnych z pierścieniami ślizgowymi włączone są oporniki rozruchowe, a to w celu umożliwienia przechodzenia z danego stopnia prędkości na następny w sposób ciągły.
11. Urządzenie napędowe według zastrz. 10, znamienne tym, że oporniki rozruchowe poszczególnych silników trakcyjnych są izolowane od siebie pod względem elektrycznym, natomiast ich napęd mechaniczny jest wspólny, przynajmniej dla poszczególnych grup silników.
12. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 11, znamienne tym, że zarówno silniki trakcyjne, jak i oporniki rozruchowe są podzielone pod względem układów przełączniowych na dwie grupy, których włączanie przy przechodzeniu z jednego stopnia prędkości na następny odbywa się kolejno, a to w celu uniknięcia bezprądowego stanu tych silników.
13. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 12, znamienne tym, że przetwornica faz posiada uzwojenie jednofazowe wysokiego napięcia i wielofazowe uzwojenie niskiego napięcia.
14. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 12, znamienne tym, że stojan przetwornicy faz, zaopatrzony ewentualnie w oddzielny transformator lub cewkę dławikową, posiada jedno wspólne uzwojenie w układzie Ferraris-Arno.
15. Urządzenie napędowe według zastrz. 1 — 14, znamienne tym, że przetwornica częstotliwości jest włączona w ten sposób, iż służy również do rozruchu przetwornicy faz.

Ganz & Co
Elektrizitäts-, Maschinen-,
Waggon- und Schiffbau,
Aktiengesellschaft
Zastępca: mgr Andrzej Au-
rzczyk patentowy

